بررسی میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس در نانو کامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی تقویت‌شده با ریبان‌های آلیاژ آمورف فاینمت*

سهیل جمالی[۱]   سمانه صاحبیان سقی[۲]   محسن حداد سبزوار[۳]

چکیده

در این پژوهش نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌های کربنی تقویت‌شده با تک لایه‌ای از آلیاژ آمورف فاینمت با ترکیب شیمیایی $Fe_{73.5}Si_{16}B_7Nb_3Cu_1$ (ساخته‌شده توسط فرآیند ذوب‌ریسی چرخشی) به منظور محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس استفاده شده است. از آزمون پراش پرتوی ایکس به‌منظور شناسایی آمورف‌بودن ریبان‌های آلیاژ فاینمت و از آزمون ارتعاش مغناطیسی نمونه جهت بررسی میزان مغناطش نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد. همچنین، به‌منظور بررسی میزان محافظت نمونه‌های تهیه‌شده، از آزمایش جذب امواج الکترومغناطیس موجبر مستطیلی در ناحیه پرتوی ایکس (۸/۲ تا ۱۲/٤ گیگاهرتز) براساس استاندارد WR90 استفاده گردید. مشاهدات حاکی از آن است که میزان محافظت موثر در برابر امواج الکترومغناطیس در ناحیه پرتوی ایکس در نمونه‌های نانوکامپوزیتی با ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی تقویت‌شده با تک ریبان آلیاژ آمورف فاینمت به مقادیر ۱۵ و ۲۰ دسی‌بل به ترتیب رسیده است.

واژه‌های کلیدی محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس، نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، اپوکسی، آلیاژ آمورف فاینمت.

The Study of Electromagnetic Interference Shielding of Carbon Nanotube/ Epoxy Nanocomposite Reinforced by Finemet Amorphous Alloy

S. Jamali   S. Sahebian Saghi   M. Haddad Sabzevar

Abstract

In this research, nano composites of epoxy /carbon nanotube reinforced by one layer of Finemet amorphous alloy with chemical composition of $Fe_{73.5}Si_{16}B_7Nb_3Cu_1$ which was fabricated by planner flow melt spinning was used to investigate the electromagnetic interference shielding. X-ray diffraction test was done to characterize the Finemet amorphous alloy. Besides, vibrating sample magnetometer test was selected to measure the amount of magnetization of nanocomposites. Shielding effectiveness of composites over the X-band (8 to 10 GHz) was carried out by rectangular waveguide based on the WR90 standard. The results showed that the shielding effectiveness at X-ray band reaches 15 and 20 dB, respectively, in samples of nanocomposite of epoxy containing 0.1 and 0.5 wt.% carbon nanotube which was reinforced by one layer of Finemet amorphous alloy.

Key Words Electromagnetic Interference Shielding, Nano Composite, Carbon Nano Tube, Epoxy, Finemet amorphous alloy

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹٦/۱/۲۱ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹٦/۹/۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد و متالورژی، گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد.   Email:s.sahebian@um.ac.ir

(۳) استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد.

DOI: 10.22067/ma.v30i2.62640

مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از وسایل الکتریکی و الکترونیکی چون کامپیوترهای دیجیتال، مودم‌ها، ایستگاه‌های تلویزیون و رادیو، مایکروویو، تلفن همراه، کامپیوتر و غیره به شدت افزایش پیدا کرده است. تعداد زیادی از این وسایل قابلیت انتشار انرژی‌های امواج رادیویی را دارند[1,3]. تابش‌های امواج الکترومغناطیس (مانند تابش‌های فرکانس بالا) می‌تواند سبب ایجاد آلودگی‌های صوتی، حرارتی و یا خرابی تجهیزات الکتریکی شوند. علاوه براین، تابش امواج مذکور تاثیرات زیانباری بر سلامتی انسان‌ها دارند[7-3]. به عنوان نمونه می‌توان به جلوگیری از بازسازی DNA و RNA در بدن انسان، افزایش احتمال سرطان‌هایی نظیر سرطان خون و تغییر در فیزیولوژی مغز انسان اشاره نمود[8]. از تاثیرات منفی امواج بر عملکرد فیزیولوژیکی بدن می‌توان به تاثیر آن در فرآیند خواب و عملکردهای ادراکی مانند ضربان قلب و فشار خون اشاره نمود[9]. در پژوهش صورت گرفته توسط میکا (Mika) نشان داده شد که امواج الکترومغناطیس منتشر شده با فرکانس ۹۰۲ مگاهرتز که توسط گوشی‌های همراه تولید می‌شود، زمان پاسخ‌گویی مغز را به کارهای ساده افزایش می‌دهد[7]. این عوامل سبب ایجاد جنجالی جهانی در رابطه با به‌خطر افتادن سلامتی انسان به دلیل انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی شده است. همچنین با توجه به روند رو به رشد استفاده از این ابزارها در کاربردهای تجاری، نظامی و محصولات الکتریکی، تولید موادی مناسب جهت محافظت در برابر انرژی‌های امواج الکترومغناطیس نیازی رو به فزونی است[1,10]. مواد محافظ در برابر امواج الکترومغناطیس، با هدف محدود نمودن انرژی امواج الکترومغناطیس و همچنین جلوگیری از تکثیر انرژی آنها در محیط، ساخته می‌شوند[11]. مکانیسم‌های محافظت مواد در برابر امواج الکترومغناطیس شامل بازتاب، جذب و بازتاب‌های متعدد است. در مکانیسم بازتاب امواج الکترومغناطیس، ماده‌ی محافظ بایستی رسانای الکتریکی باشد، که برای این امر ایجاد و اتصال مسیرهای رسانا در داخل نمونه مورد نیاز می‌شود. در اثر برخورد امواج الکترومغناطیس با الکترون‌ها و حفره‌های داخل ماده‌ی محافظ، موج بازتاب شده و این امر منجر به از دست‌رفتن مقداری از انرژی موج می‌شود. اگرچه در مواد محافظ، رسانابودن شرط اصلی نیست اما با افزایش خاصیت رسانایی در ماده، قابلیت محافظت افزایش می‌یابد[3,12-14]. دوان یوپینگ و همکارانش در ارتباط با رسانایی و حفاظت موثر (Shielding effectiveness -SE) در کامپوزیت پلی‌آنیلینگ (Poly Annealing) پژوهشی را انجام دادند. آنها رسانایی الکتریکی و حفاظت موثر کامپوزیت‌های رسانای ساخته‌شده از رزین سیلیکون با درصدهای گوناگونی از اسید هیدروکلریک آلاییده‌شده در پلی‌آنیلین (PAN-HCl) را در فرکانس‌های پایین (گستره‌ی ۳ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز) بررسی نمودند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که حفاظت موثر کامپوزیت با افزایش نسبت PAN-HCl افزایش یافته است[10]. جذب، دومین مکانیسم محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس می‌باشد. برای ایجاد مکانیسم جذب قابل توجه در محافظ، بایستی دو قطبی‌های الکتریکی و یا مغناطیسی در ماده‌ی محافظ موجود باشند. سومین مکانیسم محافظت بازتاب پی‌درپی و متوالی است. به منظور محافظت از طریق مکانیسم بازتاب‌های متعدد، ماده‌ی محافظ بایستی دارای فصل مشترک قابل توجهی باشد[15] . امواجی که تحت تاثیر این مکانیسم‌ها قرار نگیرد، بدون اتلاف توان موج از ماده عبور می‌کنند.

مواد کامپوزیتی پایه پلیمر به دلیل وزن کم، هزینه‌ی تولیدی کم، استحکام به وزن بالا و فرآوری آسان جهت بکارگیری در مواد محافظ، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند[16]. در استفاده‌ی تجاری مواد محافظ، بایستی مواد کامپوزیت پایه پلیمری دارای محافظت موثر ۲۰ دسی‌بل باشند. برای نیل به این هدف بایستی کامپوزیت ساخته‌شده دارای رسانایی حداقل ۱ زیمنس بر متر باشد. این میزان رسانش را می‌توان با استفاده از شبکه‌های

غیرپیوسته‌ی رسانای عالی ایجاد نمود[17]. در سالهای اخیر مواد کربنی مانند گرافن، گرافیت، نانولوله‌ی کربنی، نانوفایبرها به عنوان فاز ثانویه هادی در زمینه پلیمری محافظت مطلوبی را در برابر امواج مایکروویو از خود نشان دادند، که زمینه مطالعاتی جدیدی در استفاده از ساختارهای کربنی در کاربردهای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس است[6]. نانولوله‌های کربنی (Carbon Nano Tube – CNT) دارای خواص منحصر به فردی چون قطر کم، چگالی پایین، سطح مقطع زیاد، نسبت طول به قطر بالا، ساختار منحصر به فرد، رسانای الکتریکی بالا، استحکام مطلوب و پایداری حرارتی می‌باشند. از این مواد به عنوان پرکننده‌ی رسانا با بازدهی بالا در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌شود. یکی از نقاط قوت آن تولیدکامپوزیت‌های رسانا با درصد وزنی کم می-باشد[6,16,18-21]. به منظور ایجاد حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیس می‌توان از توزیع نانولوله کربنی در رزین‌های پلیمری جهت افزایش خواص الکتریکی مواد مرکب استفاده نمود[22,23]. استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان پرکننده در رزین اپوکسی به دلیل افزایش خواص مکانیکی و الکتریکی ماده مرکب در کاربردهای متنوع توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده است[24].

ینگ و همکارش پژوهشی را در فوم‌های کامپوزیتی پلی‌استیرن تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی انجام دادند. آنها با افزایش ۷ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی در کامپوزیت، حدود ۲۰ دسی‌بل میزان محافظت موثر را مشاهده کردند. علاوه بر این آنها نشان دادند استفاده از نانولوله‌های کربنی به جای نانوالیاف‌های کربنی، در پلی‌استیرن حفاظت بیشتری ایجاد می‌شود. در پژوهش آنها، مکانیسم غالب در محافظت کامپوزیت پلی‌استیرن و نانولوله‌ی کربنی، بازتاب امواج الکترومغناطیس بود[19].

لیو و همکارانش از کامپوزیت پلی‌اورتان/نانولوله‌ی کربنی تک دیواره جهت بررسی حفاظت موثر در برابر امواج الکترومغناطیس استفاده نمودند. آنها اختلاط نانولوله‌ی کربنی تک دیواره را با پلی‌اورتان به روش مخلوط سازی فیزیکی انجام دادند. ۲۰ درصد وزنی نانولوله کربنی تک‌دیواره، میزان حفاظت موثر ۱۷ دسی‌بل را از خود نشان داد. مکانیسم غالب در این ماده‌ی کامپوزیتی بازتاب بود. آنها نشان دادند که با افزایش میزان نانولوله کربنی تک‌دیواره و فرکانس، مکانیسم غالب از بازتاب به جذب تغییر می‌کند. علاوه‌بر این تحقیقات آنها نشان داد که در درصدهای وزنی بالاتر از ۱۰ درصد در فرکانس ثابت با افزایش نانولوله کربنی تک‌دیواره، خاصیت جذب در کامپوزیت افزایش یافته است. به عنوان نمونه در فرکانس ۱۲/٤ گیگاهرتز در کامپوزیت تقویت شده با ۱۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی، میزان بازتاب و جذب به ترتیب برابر ۵۲/۸ درصد و ٤۲/۷ درصد می‌باشد. آنالیز رفتار انتقال امواج الکترومغناطیس و خواص ذاتی کامپوزیت نشان داد که افزایش ممان میرایی (Loss Tangent) وابسته به افزایش قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک ماده‌ی کامپوزیتی هست[25]. محمد الصالح در سال ۲۰۱۵ بر تاثیر ساختار رسانایی بر محافظت موثر و نفوذ رسانایی نانوکامپوزیت پلیمر/نانولوله‌ی کربنی پژوهشی را انجام داد. وی نانوکامپوزیت پلیمر رسانا با حد آستانه نفوذ الکتریکی پایین و محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس بسیار بالا را با روش مخلوط‌کردن تر ساخت. در این روش، ذرات نانولوله‌ی کربنی در سطح بیرونی پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد (ultrahigh molecular weight polyethylene) قرار گرفت. شبکه‌های رسانایی جدا با آستانه نفوذ الکتریکی در ۰/۰٥٤ درصد حجمی نانولوله کربنی ایجاد شد. محمد الصالح نشان داد که در نانوکامپوزیت، با افزایش مقدار نانولوله‌ی کربنی، افزایش محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس وجود دارد و میزان محافظت در باند فرکانسی ایکس مستقل از فرکانس می‌باشد. برای مثال در ۱۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی، نانوکامپوزیت محافظت

۵۰ سی‌بل را از خود نشان داد. با توجه به ساختارهای لایه‌ی نانولوله‌ی کربنی، محافظت نانولوله‌کربنی/ پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد از تمامی گزارشات انجام شده نانولوله‌ی کربنی/ نانوکامپوزیت پلیمری ساخته‌شده، بیشتر بود. این ساختار محافظت از طریق مکانیسم جذب را به دلیل لایه‌های ضخیم‌تر نانولوله‌ی کربنی بسیار زیاد می‌کند و مکانیسم بازتاب به دلیل کاهش سطح خارجی شبکه‌های رسانا کاهش یافته است[26]. آنجو و همکارانش با استفاده از کامپوزیت پلی‌تری‌متیلن ترپتالت (Trimethylene Terephthalate) و نانولوله‌ی کربنی چنددیواره با ٤/٧٦ درصد حجمی به میزان محافظت موثر ۲۳ دسی‌بل و ٤۲ دسی‌بل در باندهای فرکانسی ایکس و Ku، به ترتیب دست یافتند. آنها همچنین دریافتند که با افزایش نانولوله‌ی کربنی میزان محافظت موثر نیز افزایش پیدا می‌کند. کامپوزیت PPT به همراه نانولوله‌ی کربنی با ۵ الی ۱۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی می‌تواند به عنوان ماده محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس استفاده شود[3,4]. علاوه بر این، چن و همکارانش پژوهشی را در رابطه با افزایش بهره‌وری کامپوزیت‌های پلی‌استر/گرافن تقویت شده با نانوذرات اکسیدآهن (Fe_3O_4) انجام دادند. آنها از روش ترکیب محلول پلی‌استر با گرماسنجی و احیا اکسید گرافن (TGO) و نانوذرات اصلاح‌شده‌ی Fe_3O_4 استفاده کردند. اصلاح سطح نانوذرات Fe_3O_4 در پژوهش آنان، سبب افزایش سازگاری با پلی‌استر و درنتیجه بهبود پراکندگی در زمینه‌ی پلی‌استر شد. آنها نشان دادند که در گستره‌ی فرکانسی ۹/۸ تا ۱۲ گیگاهرتز تنها با ۲/۲٤ درصدوزنی گرافن در کامپوزیت پلی‌استر/اکسید گرافن احیاشده/ Fe_3O_4 ، بیش از ۳۰ دسی‌بل محافظت موثر ایجاد می‌شود. رسانایی الکتریکی اکسید گرافن احیاشده و نانوذرات Fe_3O_4 مغناطیسی باعث ایجاد این مقدار محافظت شده است[27].

در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده ماده کامپوزیتی زمینه اپوکسی به میزان بالایی از حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیس در باند ایکس (۸/۲ تا ۱۲/٤ گیگاهرتز) دست یافت. به این منظور از آلیاژ آمورف فاینمت به عنوان تقویت‌کننده با خاصیت مغناطیسی خوب در فرکانس‌های بالا استفاده شد. علاوه‌بر این، جهت ایجاد رسانش در کامپوزیت زمینه اپوکسی از نانولوله‌ی کربنی در درصدهای وزنی ۰/۱ و ۰/۵ استفاده شد. در این پژوهش از آزمون امواج الکترومغناطیس موج‌بر مستطیلی جهت بررسی حفاظت موثر نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی تقویت‌شده با آلیاژ آمورف فاینمت طبق استاندارد WR90 استفاده شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از نانولوله‌ی کربنی چند دیواره و آلیاژ آمورف فاینمت با ترکیب شیمیایی $Fe_{73}Cu_1Nb_3Si_{13/5}B_{9/5}$ و رزین اپوکسی استفاده شد. همچنین به منظور حذف ناخالصی و ایجاد گروه‌های عاملی بر روی سطح نانولوله‌ی کربنی از اسید نیتریک با ٦۰ درصد خلوص ساخت مرک (آلمان) و آب دیونیزه استفاده گردید.

در تولید نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌کربنی، در مرحله‌ی ابتدایی، به منظور توزیع نانولوله‌های کربنی در اپوکسی، نانولوله‌های کربنی با استفاده از فرآیند اسیدشویی، عامل‌دار شد. بدین منظور، ۰/۱ گرم نانولوله‌ی کربنی در ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک، به مدت زمان ۲ ساعت در حمام اولتراسونیک ساخت کمپانی FALK ایتالیا (از سری LBS2 با توان 125 وات و فرکانس ٦۰-٤۰ کیلوهرتز) و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در هم‌زن مغناطیسی مخلوط گردید. شستشو با آب مقطر در چندین مرحله جهت ایجاد pH=7 انجام شد. در نهایت خشک‌نمودن نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در آون تحت شرایط خلا صورت گرفت.

جهت ساخت کامپوزیت مقداری نانولوله‌کربنی با ۱۰ گرم اپوکسی در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه توسط هم‌زن مغناطیسی، مخلوط گردید. محلول اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی در درون قالب به ضخامت ۱ میلی‌متر ریخته شد و به منظور حذف حباب‌های نمونه به

مدت ۲٤ ساعت در درون قالب تحت فشار قرار گرفت. نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی به ابعاد ۰/٤ در ۰/۹ اینچ (طبق استاندارد WR90) برش داده شد. سپس تک‌لایه‌ی آمورف فاینمت در بین نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی قرار گرفت. دو نمونه‌ی کامپوزیتی با ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی تهیه و به ترتیب با نام‌های CNT0/1 و CNT0/5 نامگذاری شده‌اند.

پراش اشعه‌ی پرتو ایکس با استفاده از اشعه Cu k∝ با طول موج ۱٫٥٤۰٤ آنگستروم در محدوده‌ی $2\theta = 10-80$ و گام ۰/۰۲ درجه به منظور تشخیص آمورف‌بودن آلیاژ فاینمت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین میزان محافظت موثر ماده‌ی مرکب تولیدی در برابر امواج الکترومغناطیس با کمک دستگاه جذب امواج الکترومغناطیس و براساس استاندارد WR90 در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگا هرتز با استفاده از روش موج‌بر مستطیلی (Rectangular Waveguide) توسط دستگاه موجبر PNA E8363B و ساختار مستطیلی (Waveguide Structure) استفاده شد. از آزمایش مغناطیس‌سنج نمونه‌ی مرتعش (Vibrating Sample Magnetometer-VSM) مدل VSMF ساخت شرکت مغناطیس دانش پژوه کاشان جهت اندازه‌گیری مغناطش ماده استفاده شد.

نتایج و بحث

در شکل (۱) طیف پراش پرتوی ایکس آلیاژ آمورف فاینمت آمده است. با توجه به شکل، پیک عنصر آهن در زاویه تقریبی ٤٤ درجه مشاهده می‌شود. به دلیل حداکثر بودن درصد عناصر آهن موجود در آلیاژ و حل‌شدن عنصرهای دیگر در آهن، شبکه آهن افزایش حجم پیدا کرده و پیکی با انحراف از پیک شبکه آهن در پراش اشعه ایکس مشاهده می‌شود. با توجه به عدم وجود پیک تیز و همچنین وجود یک پیک پهن در طیف پراش اشعه ایکس آلیاژ، می‌توان ادعا نمود که آلیاژ مورد استفاده دارای ساختاری آمورف می‌باشد.

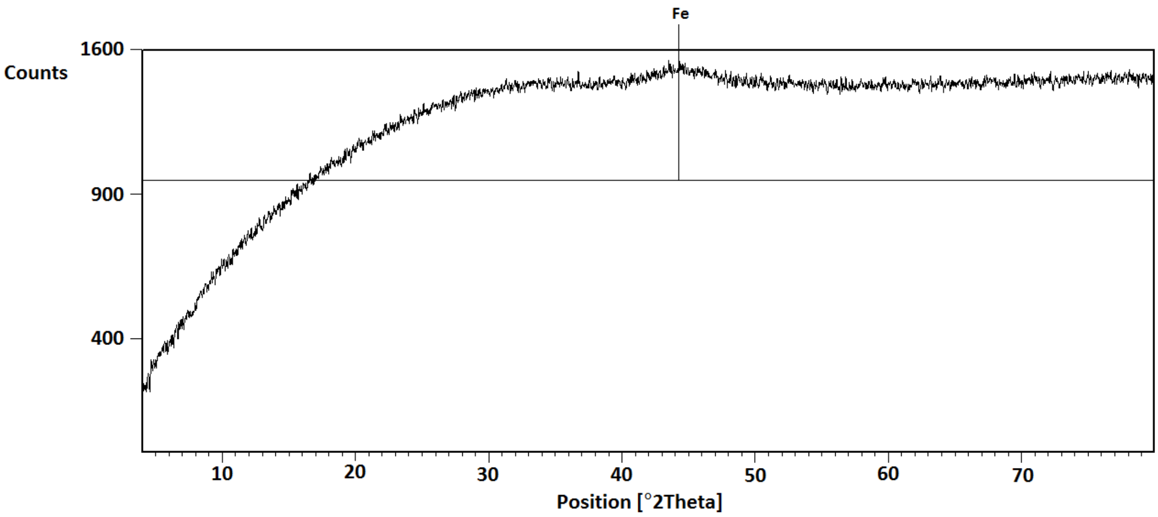
در شکل(۲) نمودار مغناطش بر حسب میدان اعمالی حاصل از آزمون مغناطیسی نمونه کامپوزیتی CNT0/5 در دمای اتاق آورده شده است. با توجه به شکل، به دلیل کم بودن مساحت محصور در نمودار، نمونه‌ی کامپوزیت تولید شده در برابر تغییر میدان اعمالی از خود مقاومتی نشان نمی‌دهد و از تلفات انرژی در اثر تغییر میدان اعمالی می‌توان صرف نظر کرد. این خاصیت نشان‌دهنده‌ی رفتار فرومغناطیس نرم نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/5 می‌باشد. به دلیل آنکه نمونه در میدان مغناطیسی، به راحتی مغناطیس می‌شود، می‌توان قابلیت محافظت امواج الکترومغناطیس از طریق مکانیسم جذب را در ماده را به مقدار کم پیش‌بینی نمود. در جدول (۱) مقادیر مغناطش اشباع، مغناطش پسماند و وادارندگی آورده شده است. با توجه به اینکه در کامپوزیت‌های ساخته‌شده، نانولوله‌های کربنی رسانا بوده و از طرفی بیشترین کسر حجمی کامپوزیت‌های ساخته‌شده مربوط به رزین اپوکسی (ماده‌ی عایق) می‌باشد، تنها از آلیاژ آمورف فاینمت انتظار خاصیت مغناطیسی می‌رود. همین امر منجر شد تا از تست مغناطیسی کامپوزیت CNT-0/1 صرف‌نظر شود و نمودار مغناطیسی آن مشابه با ماده‌ی کامپوزیتی CNT-0/5 در نظر گرفته شود.

جدول ۱ مقادیر M_S، M_R و H_C بدست‌آمده برای نمونه‌ی CNT-0/5 حاصل از آزمون VSM

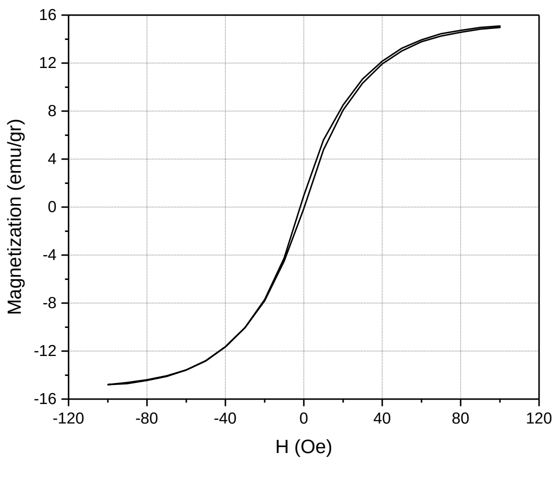
کمیت	مقدار
مغناطش اشباع (Saturate Magnetization-M_s)	۱٦emu/gr
مغناطش پسماند (Remanence- M_R)	۰/۹emu/gr
وادارندگی (Coercivity-H_c)	۱/۸٤ Oe

در شکل (۳) طیف محافظت موثر (SE) امواج الکترومغناطیس نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/1 در محدوده‌ی فرکانسی ۸ تا ۱۲/٤ گیگاهرتز (محدوده‌ی ایکس) آمده

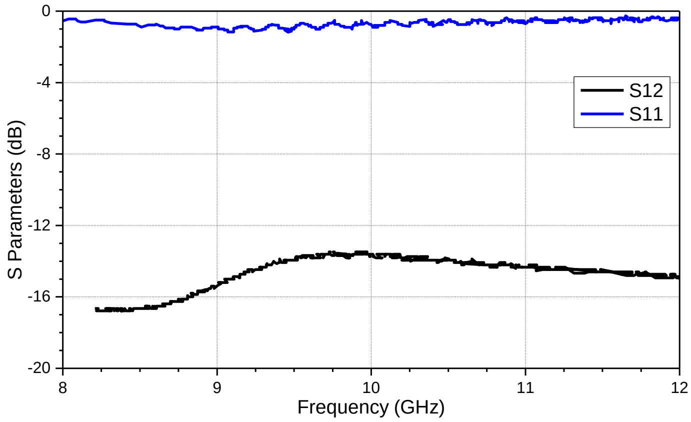
است. داده‌های خروجی این آزمایش به صورت نمودارهای S_{11} و S_{12} می‌باشد. مقادیر پارامترهای S_{11} و S_{12} به ترتیب، میزان بازتاب امواج و میزان محافظت نمونه‌ی کامپوزیتی را برحسب دسی‌بل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار S_{12} برای CNT0/1 به طور میانگین برابر ۱۵- دسی‌بل می‌باشد. با توجه به مقادیر حاصل از S_{11} در شکل (۳)، محافظت از طریق بازتاب را مکانیسم غالب در نمونه کامپوزیتی می‌توان در نظر گرفت. بازتاب امواج الکترومغناطیس را می‌توان به حضور آلیاژ آمورف فاینمت و نانولوله‌ی کربنی مربوط دانست. یانگ و همکارانش محافظت موثر کامپوزیت پایه پلیمر را در گستره‌ی فرکانسی ایکس مورد بررسی قرار دادند. با توجه به پژوهش آنها میزان محافظت نمونه‌ی کامپوزیتی با حضور ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی مقدار ۲/۵ دسی‌بل می‌باشد [۱۹]. با توجه به حضور مقدار کم نانولوله‌ی کربنی در نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/1، سهم آن در میزان محافظت کم بوده و بیشترین سهم محافظت مربوط به آلیاژ آمورف فاینمت می‌باشد.



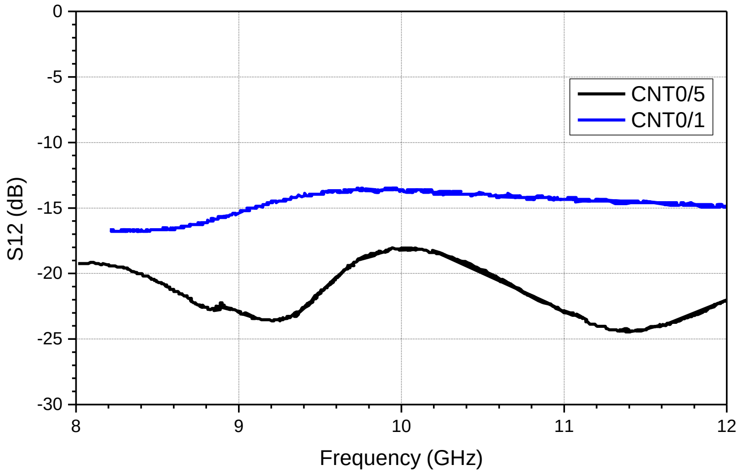
شکل ۱ طیف پراش پرتو ایکس آلیاژ آمورف فاینمت



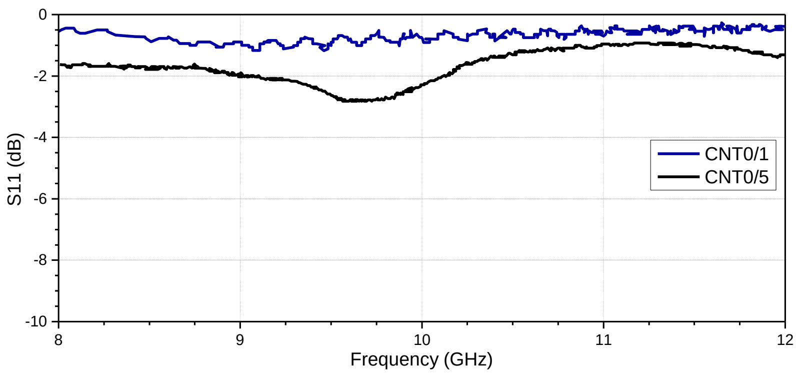
شکل ۲ نمودار مغناطش بر حسب میدان اعمالی برای نمونه‌ی کامپوزیتی CNT-0/5



شکل ۳ طیف محافظت موثر امواج الکترومغناطیس نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/1 در باند ایکس



شکل ٤ نمودار پارامتر S_{12} برای نمونه‌های کامپوزیتی CNT0/1 و CNT0/5 در باند ایکس



شکل ۵ نمودار پارامتر S_{11} نمونه‌های کامپوزیتی CNT0/1 و CNT0/5 در باند ایکس

در شکل (٤) طیف پارامتر S_{12} که نشان‌دهنده‌ی حفاظت موثر امواج الکترومغناطیس کامپوزیت می‌باشد، در باند فرکانسی ایکس (٨ تا ١٢ گیگاهرتز) برای دو نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/1 و CNT0/5 آورده شده است. با توجه

به شکل، میزان حفاظت موثر برای نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/5 برابر ۲۰- دسی‌بل می‌باشد. با افزایش درصد نانولوله‌ی کربنی میزان محافظت موثر ماده در برابر امواج الکترومغناطیس افزایش پیدا کرده است. علت آن را می‌توان مرتبط با افزایش میزان رسانایی ماده کامپوزیتی با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی دانست. با افزایش نانولوله‌ی کربنی، میزان رسانایی ماده‌ی کامپوزیتی افزایش یافته که این امر منجر به افزایش برخورد امواج الکترومغناطیس با مسیرهای رسانایی داخل نمونه‌ی کامپوزیتی می‌گردد، که سبب محافظت بیشتر در برابر امواج الکترومغناطیس می‌شود. ژیانگ و یانگ در پژوهشی میزان محافظت موثر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌ی کربنی را انجام دادند. آنها ادعا نمودند که با افزایش کسر حجمی نانولوله‌ی کربنی در کامپوزیت، میزان محافظت موثر افزایش یافته است، که به سبب افزایش رسانایی ماده‌ی کامپوزیتی در حضور نانولوله‌ی کربنی می‌باشد[28-19]. علاوه بر این نتایج آنها نشان داد که میزان محافظت موثر در کامپوزیت به کسر حجمی نانولوله‌ی کربنی وابسته است[28].

در شکل(۵) طیف پارامتر S_{11} که نشان دهنده‌ی بازتاب امواج الکترومغناطیس می‌باشد، در باند فرکانسی ایکس (۸ تا ۱۲/٤ گیگاهرتز) برای دو نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/5 و CNT0/1 آورده شده است. به توجه به شکل، میزان پارامتر S_{11} برای نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/5 برابر ۲- دسی‌بل می‌باشد. با توجه به پارامترهای S_{11} و S_{12} نمونه‌ی‌کامپوزیتی CNT0/5 مشابه نمونه‌ی CNT0/1 مکانیسم غالب جهت محافظت بازتاب امواج الکترومغناطیس توسط آلیاژ آمورف فاینمت و با سهم کمتر، توسط نانولوله‌ی کربنی می‌باشد.

با مقایسه‌ی داده‌های S_{11} دو نمونه‌ی کامپوزیتی CNT0/5 و CNT0/1 مشاهده می‌شود که میزان بازتاب امواج الکترومغناطیس با افزایش درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی کاهش یافته است، اما از آنجایی‌که حفاظت موثر در نمونه‌ی CNT0/5 نسبت به CNT0/1 روند افزایشی داشته است، می‌توان ادعا نمود که حضور نانولوله‌ی کربنی سبب افزایش حفاظت موثر توسط سایرمکانیسم‌های شده است.

برای اندازه‌گیری میزان محافظت ماده از حفاظت موثر استفاده می‌شود. حفاظت موثر مواد بر حسب نسبت توان امواج عبوری (P_i) به توان امواج برخوردی (P_o) تعریف می‌گردد. بنابراین، حفاظت موثر (SE) طبق رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$SE = 10\log(\frac{P_i}{P_o}) \qquad (۱)$$

با جایگذاری مقدار متوسط S_{21} در نمونه‌های CNT0/1 و CNT0/5 میزان افت امواج الکترومغناطیس به ترتیب برابر ۷۷/۸٦ و ۸٦/٤۷ درصد می‌باشد، که به معنای افزایش میزان محافظت موثر ماده در برابر امواج الکترومغناطیس هست.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت لایه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله‌کربنی تقویت‌شده با آلیاژ آمورف آمورف فاینمت به منظور محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی تهیه شد. نانوکامپوزیت‌های تهیه شده دارای درصدهای ۰/۱ و ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربنی می‌باشند. جهت شناسایی آمورف‌بودن لایه‌های آلیاژ آمورف از تست پراش پرتوی ایکس استفاده شد. نتایج آزمایش، حاکی از آمورف‌بودن و غالب بودن عنصر آهن در ریبان بود. از آزمون ارتعاش مغناطیسی به منظور شناسایی مغناطیس‌بودن ماده‌ی کامپوزیتی تهیه‌شده استفاده گردید. کم‌بودن میزان مقاومت ماده در برابر تغییرات میدان مغناطیسی خارجی دلیلی بر رفتار فرومغناطیس نرم نمونه‌ی کامپوزیتی تهیه شده، می‌باشد. در نهایت نمونه‌ها تحت آزمون محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس با استفاده از استاندارد WR90 در باند فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز (باند ایکس) با استفاده از موج‌بر مستطیلی‌شکل قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی CNT0/1 و CNT0/5 به ترتیب توان موج برخوردی را به میزان ۱۵ و ۲۰ دسی‌بل کاهش دادند. نتایج نشان داد،

مکانیسم غالب جهت حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیس، مکانیسم بازتاب توسط آلیاژ آمورف فاینمت و نانولوله‌های کربنی بود. حضور نانولوله‌ی کربنی در ماده‌ی کامپوزیتی، منجر به افزایش میزان رسانایی شده بود که به علت افزایش برخورد امواج الکترومغناطیس با مسیرهای رسانایی داخل نمونه‌ی کامپوزیتی، محافظت بیشتر در برابر امواج الکترومغناطیس افزایش پیدا کرد. با جایگذاری مقدار متوسط S_{21} در نمونه‌های CNT0/1 و CNT0/5 در معادله‌ی محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس، میزان افت امواج به ترتیب برابر ۷۷/۸۶ و ۸۶/۴۷ درصد بدست آمد که به معنای افزایش میزان محافظت موثر ماده‌ی کامپوزیتی در برابر امواج الکترومغناطیس هست.

مراجع

1. Cheng K., Ramakrishna S., Lee K., "Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 10, pp. 1039-1045, (2000).
2. Ozimek M., Gaworska-Koniarek D., Wilczyński W., "Shields of Electromagnetic Wave Based on Amorphous and Nanocrystalline Soft Magnetic Materials", *International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2009)*: Karpacz, Polan, (2009).
3. Verma P., et. al., "Excellent electromagnetic interference shielding and mechanical properties of high loading carbon-nanotubes/polymer composites designed using melt recirculation equipped twin-screw extruder", *Carbon*, Vol. 89, pp. 308-317, (2015).
4. Gupta A., Choudhary V., "Electromagnetic interference shielding behavior of poly (trimethylene terephthalate)/multi-walled carbon nanotube composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 71, No. 13, pp. 1563-1568, (2011).
5. Jia L.-C., et. al., "Electrically conductive and electromagnetic interference shielding of polyethylene composites with devisable carbon nanotube networks", *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, No. 36, pp. 9369-9378, (2015).
6. Singh A.P., et. al., "Probing the engineered sandwich network of vertically aligned carbon nanotube–reduced graphene oxide composites for high performance electromagnetic interference shielding applications", *Carbon*, Vol. 85, pp. 79-88, (2015).
7. Zhang L., et. al., "Preparation and characterization of graphene paper for electromagnetic interference shielding", *Carbon*, Vol. 82, pp. 353-359, (2015).
8. Su C.-I., Chern J.-T., "Effect of stainless steel-containing fabrics on electromagnetic shielding effectiveness", *Textile Research Journal*, Vol. 74, No. 1, pp. 51-54, (2004).
9. Huber R., et. al., "Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human

sleep EEG", *Neuroreport*, Vol. 11, No. 15, pp. 3321-3325, (2000).

10. Yuping D., Shunhua L., Hongtao G., "Investigation of electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of polyaniline composite", *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 6, No. 5, pp. 513-518, (2005).
11. Neelakanta P.S., "Handbook of electromagnetic materials: monolithic and composite versions and their applications", *CRC press*, (1995)
12. Chung D., "Materials for electromagnetic interference shielding", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9, No. 3, pp. 350-354, (2000).
13. Shahzad F., et. al., "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)", *Science*, Vol. 353, No. 6304, pp. 1137-1140, (2016).
14. Cao M.-S., et. al., "Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding", *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, No. 26, pp. 6589-6599, (2015).
15. Yang S., et. al. "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 36, No. 5, pp. 691-697, (2005).
16. Jou W.-S., Cheng H.-Z., Hsu C.-F., "The electromagnetic shielding effectiveness of carbon nanotubes polymer composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 434, pp. 641-645, (2007)
17. Yan D.X., et. al., "Structured Reduced Graphene Oxide/Polymer Composites for Ultra-Efficient Electromagnetic Interference Shielding", *Advanced Functional Materials*, Vol. 25, No. 4, pp. 559-566, (2015).
18. Shi S.-L., Liang J., "The effect of multi-wall carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding of ceramic composites", *Nanotechnology*, Vol. 19, No. 25, pp. 255707, (2008).
19. Yang Y., et. al., "Novel Carbon Nanotube−Polystyrene Foam Composites for Electromagnetic Interference Shielding", *Nano Letters*, Vol. 5, No. 11, pp. 2131-2134, (2005).
20. Kong K., et. al., "Effect of processing methods and functional groups on the properties of multi-walled carbon nanotube filled poly (dimethyl siloxane) composites", *Polymer bulletin*, Vol. 69, No. 8, pp. 937-953, (2012).
21. Mathur R., et. al., "Electrical and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced PMMA and PS composites", *Polymer Composites*, Vol. 29, No. 7, pp. 717-727, (2008).
22. Micheli D., et. al., "Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete composite reinforced with carbon nanotubes in the mobile phones frequency band", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 188, pp. 119-129, (2014).
23. Hayashida K., Matsuoka Y., "Electromagnetic interference shielding properties of polymer-grafted carbon nanotube composites with high electrical resistance", *Carbon*, Vol. 85, pp. 363-371, (2015).

24. Kotsilkova R., et. al., "Effects of sonochemical modification of carbon nanotubes on electrical and electromagnetic shielding properties of epoxy composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 106, pp. 85-92, (2015).
25. Liu Z., Chen Y., "Reflection and absorption contributions to the electromagnetic interference shielding of single-walled carbon nanotube/polyurethane composites", *Carbon*, Vol. 45, No. 4, pp. 821-827, (2007).
26. Al-Saleh M.H., "Influence of conductive network structure on the EMI shielding and electrical percolation of carbon nanotube/polymer nanocomposites", *Synthetic Metals*, Vol. 205, pp. 78-84, (2015).
27. Chen Y., et. al., "Enhanced electromagnetic interference shielding efficiency of polystyrene/graphene composites with magnetic Fe_3O_4 nanoparticles", *Carbon*, Vol. 82, pp. 67-76, (2015).
28. Xiang C., Pan Y., Guo J., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of multiwalled carbon nanotube reinforced fused silica composites", *Ceramics international*, Vol. 33, No. 7, pp. 1293-1297, (2007).